蒙古高原干旱时空特征及对植被物候的累积影响

张巧凤[1,2]， 于红博[1,2]， 黄 方[3]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 电子科技大学资源与环境学院，四川 成都 611731）

摘 要： 蒙古高原是中国北方重要的生态安全屏障，为厘清蒙古高原干旱时空动态及对植被物候的影响，利用SPEIbase 2.9数据集和基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法反演的植被物候数据集，分析1982—2022年蒙古高原干旱时空特征及干旱对植被返青期和枯黄期的累积影响。结果表明：(1) 不同尺度SPEI均呈显著下降趋势，随着时间尺度的增加干旱化趋势加剧、干旱化面积明显增大，中部和西部地区干旱化尤为严重。(2) 植被返青期提前和推迟的面积占比分别为50.03%和49.97%，枯黄期推迟和提前的面积占比分别为67.85%和32.15%；荒漠草原返青期和枯黄期主要表现为推迟趋势，针叶林和森林草原北部返青期显著提前、枯黄期呈推迟趋势。(3) 蒙古高原（荒漠除外）79.62%的区域植被返青期与1~12个月尺度SPEI呈最大正相关，干旱尺度主要为中期尺度，尤其7~9个月尺度的干旱对植被返青期影响明显；54.15%的区域植被枯黄期与SPEI呈最大负相关，干旱尺度主要为1~3个月尺度。其结果对防御蒙古高原干旱及对植被物候和生产力的影响具有重要意义。

关键词： 干旱；植被物候；返青期；枯黄期；蒙古高原

全球气候变暖对所有陆地和海洋生态系统以及人类系统造成了严重的影响，极端干旱、暴雨洪涝、高温热浪、沙尘暴和台风等自然灾害频率明显上升[1-2]，造成严重的环境破坏和社会经济损失，直接威胁自然生态系统和人类社会的安全[1]。为了适应不断发生的气候和环境变化，许多陆地、淡水和海洋物种已经改变了其地理分布范围、季节活动和迁徙规律等[3]。植被作为陆地生态系统的主体，在调节全球碳平衡、缓减大气CO_2浓度和水土保持等方面具有重要作用[4]，是实现自然和人类生态环境可持续发展的重要因素。植被物候是植物生长过程的季节性周期及其对气候响应的表现，是气候变化重要的指示器[5-6]；气候变化对植被物候的影响程度直接决定了植被的生长期长短和生产力高低[7]，进而影响植被的固碳能力。

北半球中高纬度是地球上植被覆盖面积最大的一个纬度带，蒙古高原是该纬度带的主体之一。已有研究表明，过去70 a蒙古高原经历了显著的变暖趋势，其温度上升速率远高于全球0.6 ℃的平均水平[8-10]。随着全球气候持续变暖，蒙古高原自然灾害事件频发，夏季极端干旱、冬季白灾/黑灾等事件加剧[11-13]，直接影响该地区的陆地生态系统功能和畜牧业生产力，造成巨大的自然生态和社会经济损失[12-14]。Lu等[15]研究表明，2000年以来的连续干旱和极端干旱已经消减了蒙古高原20世纪所累积的40%的碳汇，直接导致该地区生态系统从碳汇转变为碳源。众多关于植被物候变化的研究表明，极端温度和干旱显著影响植被的物候期和生产力[6-7]，植被物候对极端气候的响应比平均气候状态更敏感[16-18]，植被的极端物候变化比正常物候规律对陆地生态系统的影响更显著[6-7]，干旱对蒙古高原植被物候的影响具有很强的空间异质性和季节波动性[19]。目前对蒙古高原植被物候变化的影响因素分析主要集中在气候因子（如降水、气温等）、积雪因子和土壤湿度等方面[19-20]，而干旱对植被物候的累积影响分析较少。因此，作为全球气候变暖背景

收稿日期： 2024-03-07； **修订日期：** 2024-04-01
基金项目： 内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金（2022JBQN097）；内蒙古自然科学基金（2021MS04015，2023MS04005）；留学回国人员创新创业启动计划项目资助
作者简介： 张巧凤（1978-），女，博士，副教授，主要从事气候变化、干旱监测及对植被的影响研究. E-mail: zhangqf@imnu.edu.cn

下常见的极端气候之一,进一步厘清不同时间尺度的干旱特征及其对植被物候的累积影响机制,对分析蒙古高原干旱灾害及对植被物候、植被生产力、植被碳汇/源等的影响机制具有重要意义。

标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index,SPEI)基于气候水量平衡模型引入对干旱有重要影响的潜在蒸散量,而气温是影响潜在蒸散量的重要因素,因此,SPEI综合考虑了降水和气温变化对干旱的影响;加之其多时间尺度的优势,被广泛应用于全球不同区域的干旱监测与评估[21-23]。SPEIbase 2.9数据集利用彭曼(Penman-Monteith)公式计算潜在蒸散量[22,24],可用于监测全球范围长期、多时间尺度、近实时的干旱状况。Wang等[25]利用内蒙古46个气象站点数据计算12个月尺度SPEI对SPEIbase 2.4进行精度验证,结果表明站点SPEI和格网SPEI显著线性相关,相关系数达0.8306;空间上所有站点的相关系数均通过0.05的显著性检验,说明该数据集具有很好的精度和适用性。

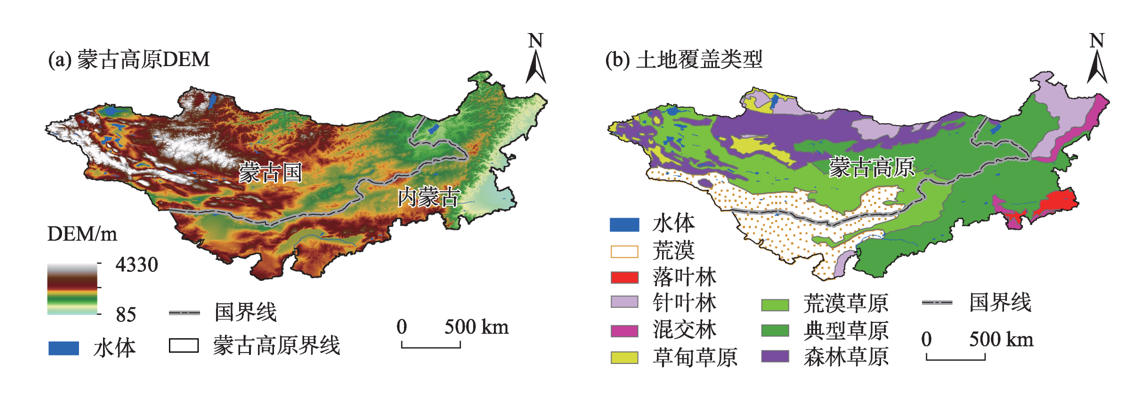
物候监测方面,随着遥感技术的快速发展,尤其是长时间序列植被指数数据集的发布,如美国NASA全球库存监测与模型系统(Global Inventory Monitoring and Modeling System,GIMMS)发布的第三代归一化植被指数数据集(Normalized Difference Vegetation Index-3rd generation,NDVI3g)和NOAA国家环境信息中心发布的气候数据记录(Climate Data Record,CDR)NDVI数据集等,植被物候监测也从传统的野外定点观察方法[5]拓展到利用卫星遥感技术获取大范围的植被物候信息,克服了以往定点观察的局限性,为区域乃至全球尺度的植被物候信息提取开辟了新途径[26-28];相比于TIMESAT需要设置和调整很多参数和阈值且不同的设置结果可能差异很大[29]的缺陷,基于遥感植被指数的Logistic曲线曲率极值法[27-28]由于其不需要调整参数和定义阈值等优点,成为区域和全球尺度上遥感反演植被物候的主要方法之一,广泛应用于北半球中高纬度地区[26-28,30]。

干旱对植被的影响具有长期性和隐蔽性,预防长期干旱(一年以上)具有一定的困难和麻痹性,因此定量分析一年尺度(1~12个月)的干旱对植被物候的累积影响,对提高牧业管理和经营者的警惕性和执行力、预防干旱以及干旱导致的植被产量下降、保持草畜平衡等方面具有重要意义。因此本文采用基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法[27],反演蒙古高原1982—2022年植被返青期(Start of the growing Season,SOS)和枯黄期(End of the growing Season,EOS)物候数据集,并基于SPEIbase 2.9数据集分析蒙古高原年内尺度的干旱时空特征及对植被返青期和枯黄期的累积影响。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

蒙古高原位于欧亚大陆中部(37°22′~53°20′N,87°43′~126°04′E),是中国北方重要的生态安全屏障,包括我国的内蒙古自治区和蒙古国,面积约2.75×10^6 km^2[31]。蒙古高原地形复杂,西北地区为高山、东部和中部为丘陵和较为平坦的草原、西南部为戈壁荒漠;整体海拔在85~4330 m,西部海拔高达4000 m以上,平均海拔1287.5 m(图1a)。北部和东北部为湿润半湿润气候,中部、西部和西南部分别



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5447号,对底图边界无修改。下同。

图1 蒙古高原DEM和土地覆盖类型

Fig. 1 Topography and different land cover types in the Mongolian Plateau

为半干旱和干旱气候,年平均气温在1.5~16 ℃,年降水量在200~400 mm[19]。受地理位置、地形地势和多元气候类型的影响,根据全球野生动物基金会出版的全球陆地生态区划数据集,蒙古高原植被类型包括针叶林、落叶林、混交林、森林草原、草甸草原、典型草原、荒漠草原和荒漠等[19](图1b)。

1.2 数据来源

SPEIbase 2.9是覆盖全球范围、长时间序列(1901—2022年)且不同时间尺度(1~48个月)的SPEI干旱监测数据集,空间分辨率为0.5°,数据来源于西班牙科学研究委员会(https://spei.csic.es/),SPEI计算方法详见数据来源网站。采用最邻近插值法重采样为0.05°。根据国家气象干旱等级标准(GB/T 20481-2017)划分干旱等级(表1),分析蒙古高原1、3、6、12个月尺度干旱时空特征,并基于1~12个月尺度SPEI分析蒙古高原的干旱对植被返青期和枯黄期的累积效应。

表1 SPEI干旱等级划分

Tab. 1 Drought grades classification of SPEI

干旱等级	SPEI
无旱	SPEI>-0.5
轻旱	-1.0<SPEI≤-0.5
中旱	-1.5<SPEI≤-1.0
重旱	-2.0<SPEI≤-1.5
特旱	SPEI≤-2.0

NDVI数据来源于美国NOAA国家环境信息中心(https://www.ncei.noaa.gov/)CDR NDVI数据集(1982—2022年),时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.05°。采用Savitzky-Golay(S-G)滤波方法对原始NDVI数据集进行平滑处理。为避免天尺度NDVI缺测值较多的影响,采用最大值合成法构建1982—2022年半月尺度NDVI数据集,基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法反演近41 a蒙古高原植被返青期(SOS)和枯黄期(EOS)数据集。

蒙古高原DEM来源于美国航空航天局和地质调查局发布的SRTM 90 m分辨率数字高程数据(http://srtm.csi.cgiar.org)。蒙古高原植被类型来源于全球野生动物基金会发布的全球陆地生态区划数据集(https://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world)。

1.3 研究方法

1.3.1 时空变化分析 采用非参数Pettitt检验[32]进行1982—2022年干旱特征的突变检测。Pettitt检验是基于数据的秩次变化进行突变检测,该方法比Mann-Kendall(M-K)检验更适用于非正态分布数据序列的突变检测[19,33]。

设时间序列$S_n = (s_1, s_2, \cdots, s_n)$,Pettitt检验方法首先把$S_n$分为两组:$s_1, s_2, \cdots, s_k$和$s_{k+1}, s_{k+2}, \cdots, s_n$。统计量$U_k$计算公式如下[19]:

$$U_k = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=k+1}^{n} \mathrm{sgn}(s_i - s_j), 1 \leqslant k < n \tag{1}$$

$$\mathrm{sgn} = \begin{Bmatrix} 1, & s_i > s_j \\ 0, & s_i = s_j \\ -1, & s_i < s_j \end{Bmatrix} \tag{2}$$

然后求U_k绝对值的最大值U,$U = \max\left|U_k\right|$,最大值U所对应的k点即为可能的突变时间点[19,34]。

显著性检验计算公式如下:

$$3P = 2exp^{\frac{-6U^2}{(n^3 + n^2)}} \tag{3}$$

当P<0.05时,s_k即为显著突变点。

时空变化趋势分析采用一元线性回归$y = ax + b$,显著性检验采用F检验,置信度均为0.05。显著性检验分为四类:当a>0且P>0.05为增加不显著(Not Significantly Increased,NSI),a>0且P≤0.05为显著增加(Significantly Increased,SI),当a<0且P>0.05为减小不显著(Not Significantly Decreased,NSD),a<0且P≤0.05为显著减小(Significantly Decreased,SD)。

1.3.2 基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法 基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法反演蒙古高原植被返青期(SOS)和枯黄期(EOS)[27],共包括4个步骤:(1) 根据每年所有NDVI影像计算基于像元的累积NDVI。(2) 用四参数Logistic模型拟合累积NDVI并插值为日尺度NDVI(公式4)。(3) 计算拟合Logistic曲线的变化率(公式5~6)。(4) 确定每个像元在曲率变化率达到最大值和最小值时的日期就是对应的SOS和EOS。为避免非植被区的影响并保证数据分析的可重复性,本文未分析荒漠区。

$$y(t) = \frac{c}{1 + e^{a + bt}} + d \tag{4}$$

$$K = \frac{d\alpha}{ds} = \frac{b^2 cz(1 - z)(1 + z)^3}{\left[(1 + z)^4 + (bcz)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \tag{5}$$

$$z = e^{a + bt} \tag{6}$$

式中：$y(t)$为时间t对应的Logistic拟合NDVI值；a和b为拟合参数；d为最小NDVI值；$c + d$为累积NDVI的最大值；e为指数函数的底数；α为时间t时单位切线向量沿可微曲线的角度（弧度）；s为拟合NDVI曲线的单位长度；K为任意时间t时的第一曲率。

1.3.3 干旱对植被返青期和枯黄期的影响 由于蒙古高原的植被返青期主要集中在4—5月，枯黄期主要集中在9—10月。分别利用1982—2022年的平均返青期和枯黄期提取4月、5月的植被返青区域界线以及9月、10月的植被枯黄区域界线。

为准确分析干旱对不同月份返青期和枯黄期的累积效应，分别计算1~12个月尺度SPEI与4月和5月返青期SOS的Person相关系数（公式7），并提取1~12个月尺度相关系数的最大值及其对应的时间尺度，该尺度即被认为是干旱对该月植被返青期的累积影响尺度[35]（公式8）。

$$Corrcoef_{ij} = \mathrm{Corr}\left(\mathrm{SOS}_i, \mathrm{SPEI}_j\right) \tag{7}$$

$$R_{\max_i} = \max\left(Corrcoef_{ij}\right),\ i = 4, 5;\ j = 1, 2, \cdots, 12 \tag{8}$$

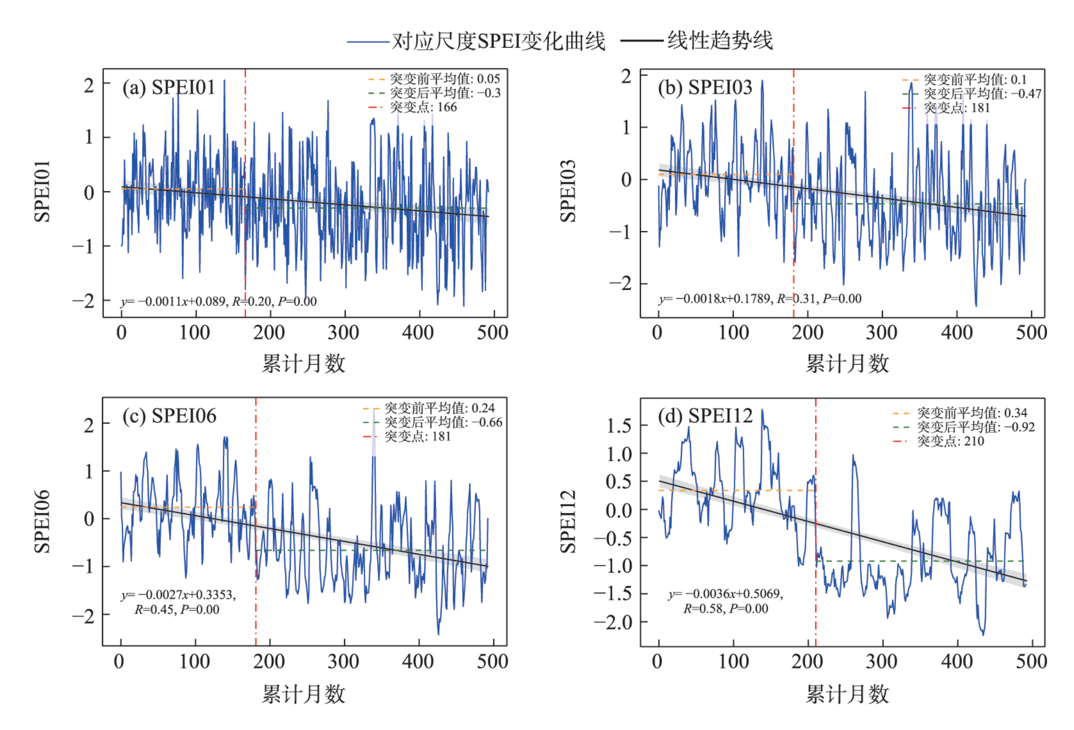
式中：i为不同植被返青月份；j为SPEI的累积时间尺度（j=1为当月）；$Corrcoef_{ij}$为i月返青期（SOS_i）与j尺度干旱指标（SPEI_j）的Person相关系数；Corr为Person相关分析函数；$R_{\max_i}(i = 4, 5)$分别为4月和5月的植被返青期与12个干旱尺度的最大相关系数，最大相关系数对应的时间尺度即为干旱对该月植被返青期的最大影响尺度。同理，分别计算1~12个月尺度SPEI与9月和10月枯黄期EOS的Person相关系数，并提取1~12个月尺度相关系数的最大值及其对应的时间尺度，该尺度即被认为是干旱对该月植被枯黄期的累积影响尺度[35]。

2 结果与分析

2.1 干旱时空演变特征

为分析蒙古高原近41 a不同时间尺度的干旱时空变化特征，分别将蒙古高原1、3、6、12个月尺度SPEI（SPEI01、SPEI03、SPEI06、SPEI12）求平均形成时间序列，每个尺度的492个SPEI（41×12=492）形成空间分析序列。

1982—2022年不同尺度SPEI均表现为显著下降趋势（图2），1、3、6、12个月尺度SPEI变化率分别为−0.0011、−0.0018、−0.0027和−0.0036，随着时间尺



注：SPEI01、SPEI03、SPEI06、SPEI12分别为1、3、6、12个月尺度SPEI。Pettitt检验显著性P值结果均为0，即四个尺度SPEI均发生显著突变。下同。

图2 1982—2022年蒙古高原不同时间尺度SPEI变化趋势

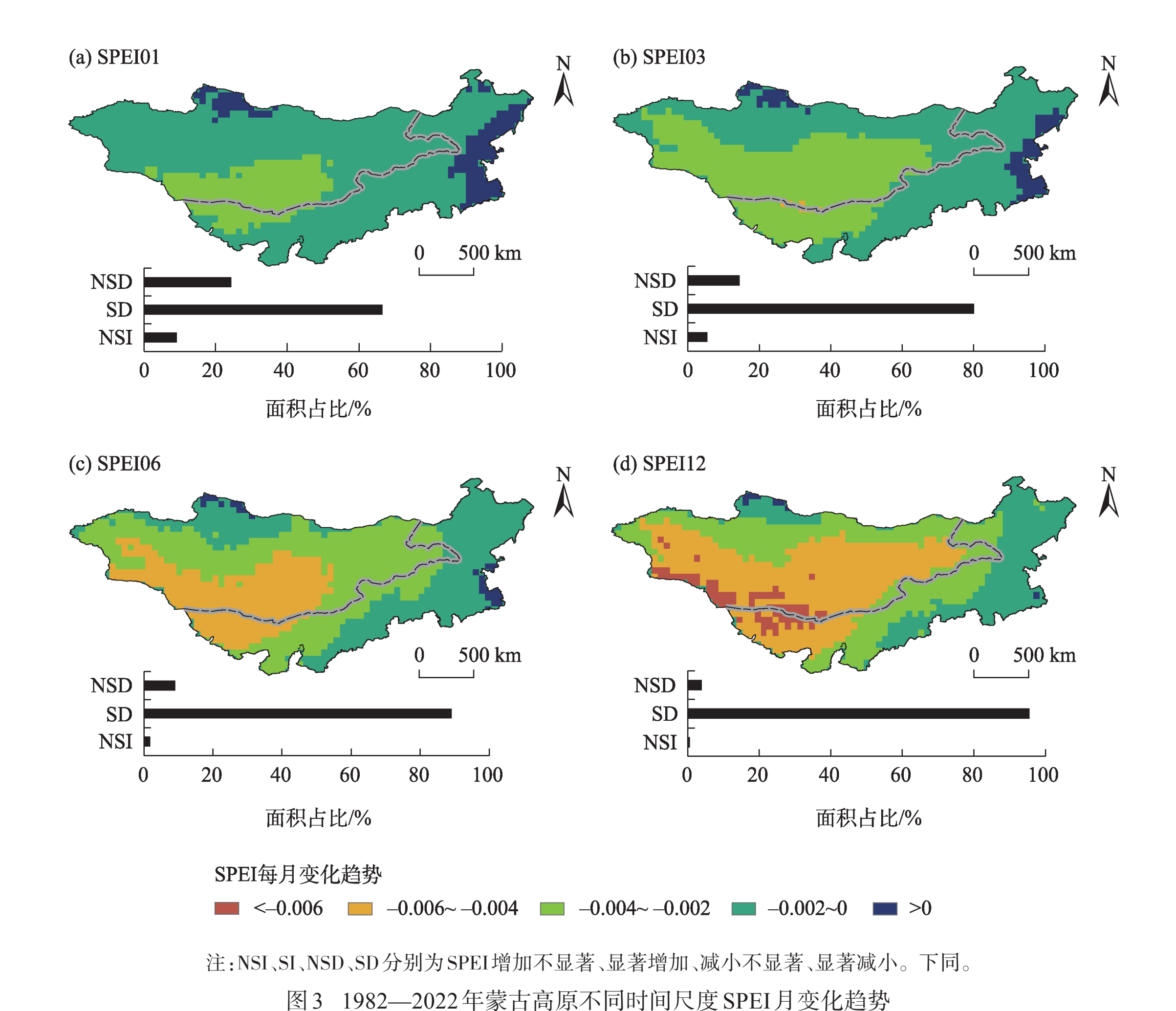
Fig. 2 The changing trends of different timescales of SPEI in the Mongolian Plateau during 1982–2022

度的增加干旱化趋势加剧；Pettitt检验表明1、3、6、12个月尺度的SPEI均有显著突变点，分别为第166、181、181和第210个月，分别对应1995年10月、1997年1月、1997年1月和1999年6月。随着干旱累积尺度的增加，突变点前后的SPEI平均值下降幅度增大，分别为0.35、0.57、0.90和1.26，说明蒙古高原长时间尺度的干旱化程度加剧。虽然不同尺度SPEI均为下降趋势，1、3个月尺度SPEI突变后的平均值分别为-0.30和-0.47，仍为正常等级(图2a，图2b)；6、12个月尺度SPEI突变后的平均值分别为-0.66和-0.92，分别为轻旱和中旱等级(图2c，图2d)。

蒙古高原不同尺度的SPEI空间变化趋势表明(图3)，各尺度SPEI均呈现由北向南、由东向西下降幅度增大的趋势。1、3、6、12个月尺度SPEI分别有90.88%、94.51%、98.19%、99.40%的区域呈下降趋势，其中分别有66.59%、80.06%、89.15%、95.49%的区域显著下降。随着SPEI累积尺度的增加，蒙古高原呈干旱化趋势的面积明显增大，中部和西部地区干旱化趋势尤为严重。

2.2 植被返青期和枯黄期变化特征

近41 a植被返青期的空间变化表明(图4)，蒙古高原植被返青期主要集中在4月和5月，4月返青的植被主要分布在蒙古高原东部和西南部，主要为针叶林区、荒漠草原区、典型草原区的西南部和东南部，占植被区总面积(荒漠除外)的44.12%；5月返青的植被主要分布在蒙古高原的北部和中东部，主要为森林草原和典型草原的大部分地区，占植被区总面积的54.74%(图4a)。蒙古高原北部和中东部的植被返青期呈提前趋势，主要为针叶林区、森林草原北部和典型草原中部，变化率在0~1.88之间，其中针叶林和森林草原北部返青期显著提前；荒漠草原、典型草原西南部以及呼伦贝尔草原周边地区主要呈现推迟趋势，变化率在0~1.92。返青期提前和推迟的面积占比分别为50.03%和49.97%，其中分别有14.88%和10.38%的区域通过显著性检验(图4b，图4c)。



注：NSI、SI、NSD、SD分别为SPEI增加不显著、显著增加、减小不显著、显著减小。下同。

图3 1982—2022年蒙古高原不同时间尺度SPEI月变化趋势

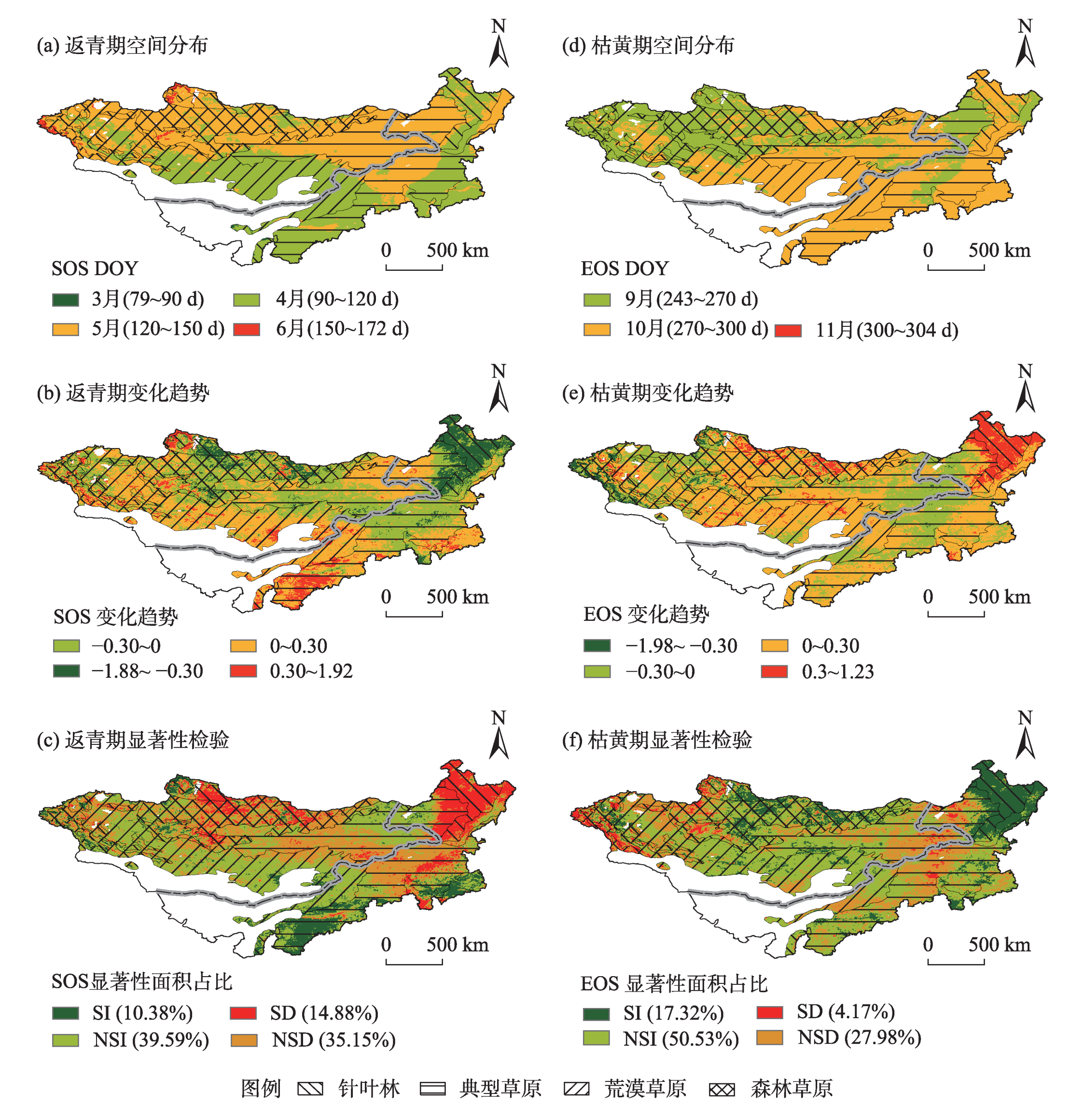
Fig. 3 Monthly changing trends of SPEI at different timescales in the Mongolian Plateau during 1982-2022

近41 a植被枯黄期的空间变化表明(图4),蒙古高原植被枯黄期主要集中在9月和10月,9月枯黄的植被主要分布在内蒙古大兴安岭西麓的典型草原和蒙古国西北部的森林草原区,占植被区总面积(荒漠除外)的38.99%;10月枯黄的植被主要分布在内蒙古大兴安岭东麓的针叶林区和典型草原区以及蒙古高原中部典型草原和荒漠草原区,占植被区总面积的61%(图4d)。蒙古高原东部和中西部大部分地区枯黄期呈现推迟趋势,变化率在0~1.23,尤其是针叶林区枯黄期显著推迟;大兴安岭西麓的典型草原区和蒙古国西北部少部分地区的植被枯黄期呈提前趋势,变化率在0~1.98。枯黄期推迟和提前的面积占比分别为67.85%和32.15%,其中分别有17.32%和4.17%的区域通过显著性检验(图4e,图4f)。

2.3　干旱对植被返青期的累积影响

1982—2022年蒙古高原(荒漠除外)98.86%的区域平均返青期集中在4—5月(图4a),因此本部分只分析1~12个月尺度的干旱累积效应对4月和5月植被返青期的累积影响。

4月SOS与1~12个月尺度SPEI的最大相关系数呈正、负相关的面积占比分别为74.76%和25.24%,其中25.73%的区域最大正相关系数超过0.4;干旱尺度主要为4~9个月尺度,占4月返青植被



注:SOS、EOS分别为返青期和枯黄期;DOY代表一年中的第几天。下同。

图4　1982—2022年蒙古高原植被物候空间分布及变化特征

Fig. 4　Spatial patterns and the changing trends of vegetation phenology in the Mongolian Plateau during 1982-2022

的71.19%,其中4~6个月和7~9个月的面积占比分别为29.98%和41.21%(图5a,图5b)。5月SOS与1~12个月尺度SPEI的最大相关系数呈正、负相关的面积占比分别为83.41%和16.59%,其中,20.78%的区域最大正相关系数超过0.4;干旱尺度主要为4~9个月的中期尺度,占5月返青植被的73.36%,其中最大尺度为7~9个月的面积百分比占63.83%(图5c,图5d)。

总体来看,蒙古高原(荒漠除外)79.62%的植被返青期与1~12个月尺度SPEI呈最大正相关,干旱尺度为4~9个月的面积占72.41%,其中7~9个月尺度占53.93%(图5e,图5f)。正相关效应表明SPEI指数值越小、植被返青期越早。4月、5月和蒙古高原的整体分析表明,干旱对蒙古高原植被返青期的影响主要表现为提前效应,干旱尺度主要为4~9个月的中期尺度,尤其是7~9个月尺度的累积干旱对植被返青期影响明显。

2.4 干旱对植被枯黄期的累积影响

1982—2022年蒙古高原(荒漠除外)99.99%的区域平均枯黄期集中在9—10月(图4d),因此本部分只分析1~12个月尺度的干旱累积效应对9月和10月植被枯黄期的影响。

9月EOS与1~12个月尺度SPEI的最大相关系数呈正、负相关的面积占比分别为52.27%和47.73%,其中94.32%的区域最大相关系数在0~±0.4之间;干旱影响尺度主要为1~3个月尺度,占9月枯

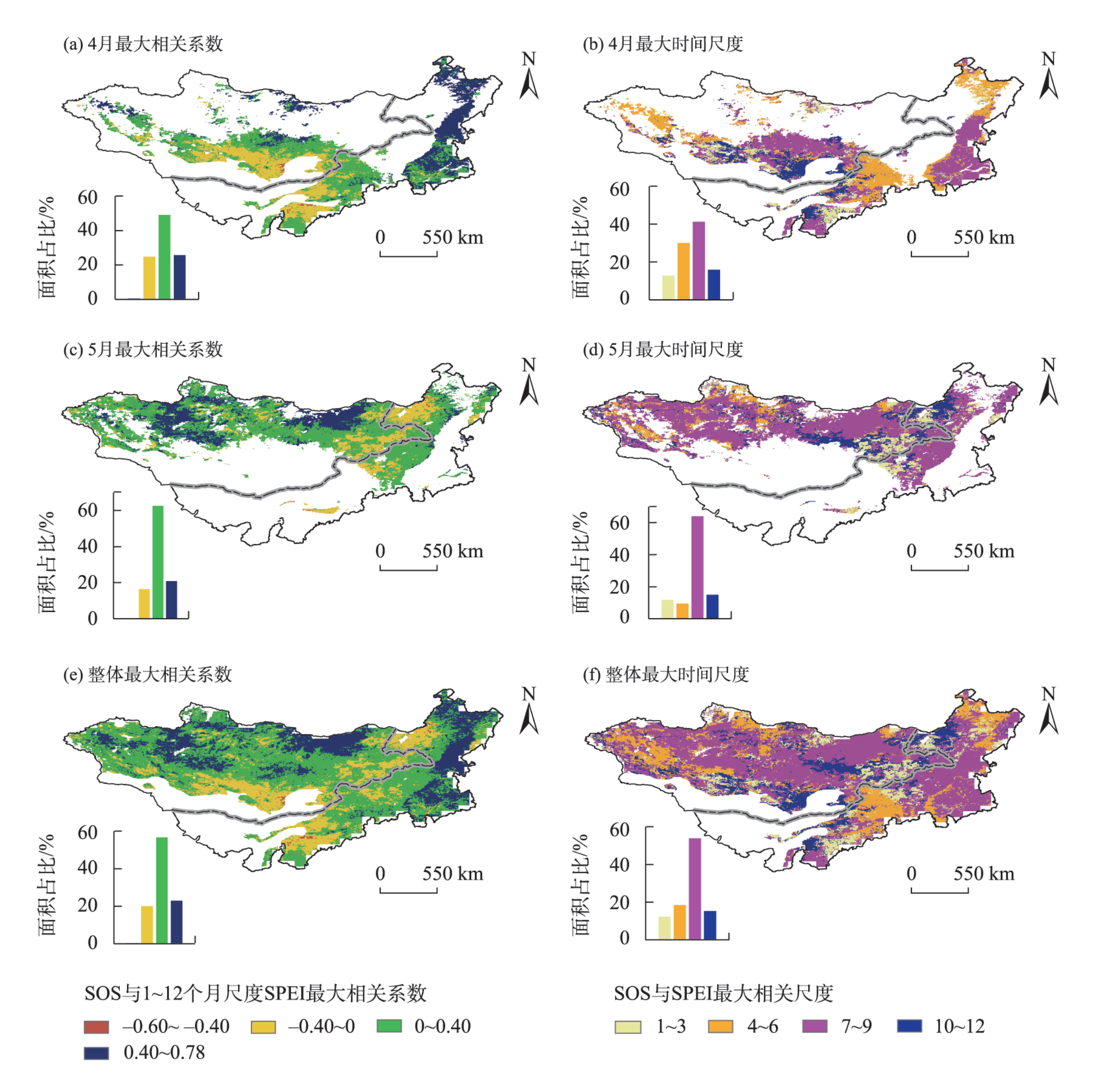


图5 1982—2022年蒙古高原植被返青期与1~12个月尺度SPEI最大相关系数及最大时间尺度

Fig. 5 The maximum correlation coefficients and corresponding maximum timescales between SOS and 1−12 months timescales of SPEI in the Mongolian Plateau during 1982−2022

黄植被的67.24%(图6a,图6b)。10月EOS与1~12个月尺度SPEI的最大相关系数呈正、负相关的面积占比分别为41.64%和58.36%,其中12.31%的区域最大负相关系数超过-0.4;干旱影响尺度主要为1~3个月短期尺度,占10月枯黄植被的71.13%(图6c,图6d)。

总体来看,蒙古高原(荒漠除外)54.15%的植被枯黄期与1~12个月尺度SPEI呈最大负相关、45.85%的植被枯黄期与SPEI呈最大正相关,干旱尺度为1~3个月的面积占69.59%(图6e,图6f)。负相关效应表明SPEI指数值越小、植被枯黄期越晚,蒙古高原干旱对植被枯黄期的影响主要表现为推迟效应,干旱尺度主要为1~3个月的短期尺度。

3 讨 论

气温和降水是主导干旱的主要气候因子,秦福莹等[10]研究表明蒙古高原1961—2014年年平均气温呈显著上升趋势,上升速率约为全球平均速率的两倍,而年降水量呈下降趋势;Luo等[19]研究表明1982—2019年蒙古高原的降水呈下降趋势,气温呈上升趋势,土壤湿度呈显著下降趋势;本文分析结果亦表明不同尺度SPEI均呈显著下降趋势;说明蒙古高原气候呈现显著的暖干化趋势[10,36]。防御暖干化气候导致的极端干旱、植被生态变化等自然灾害应成为该地区保持生态环境可持续发展的重要任务。

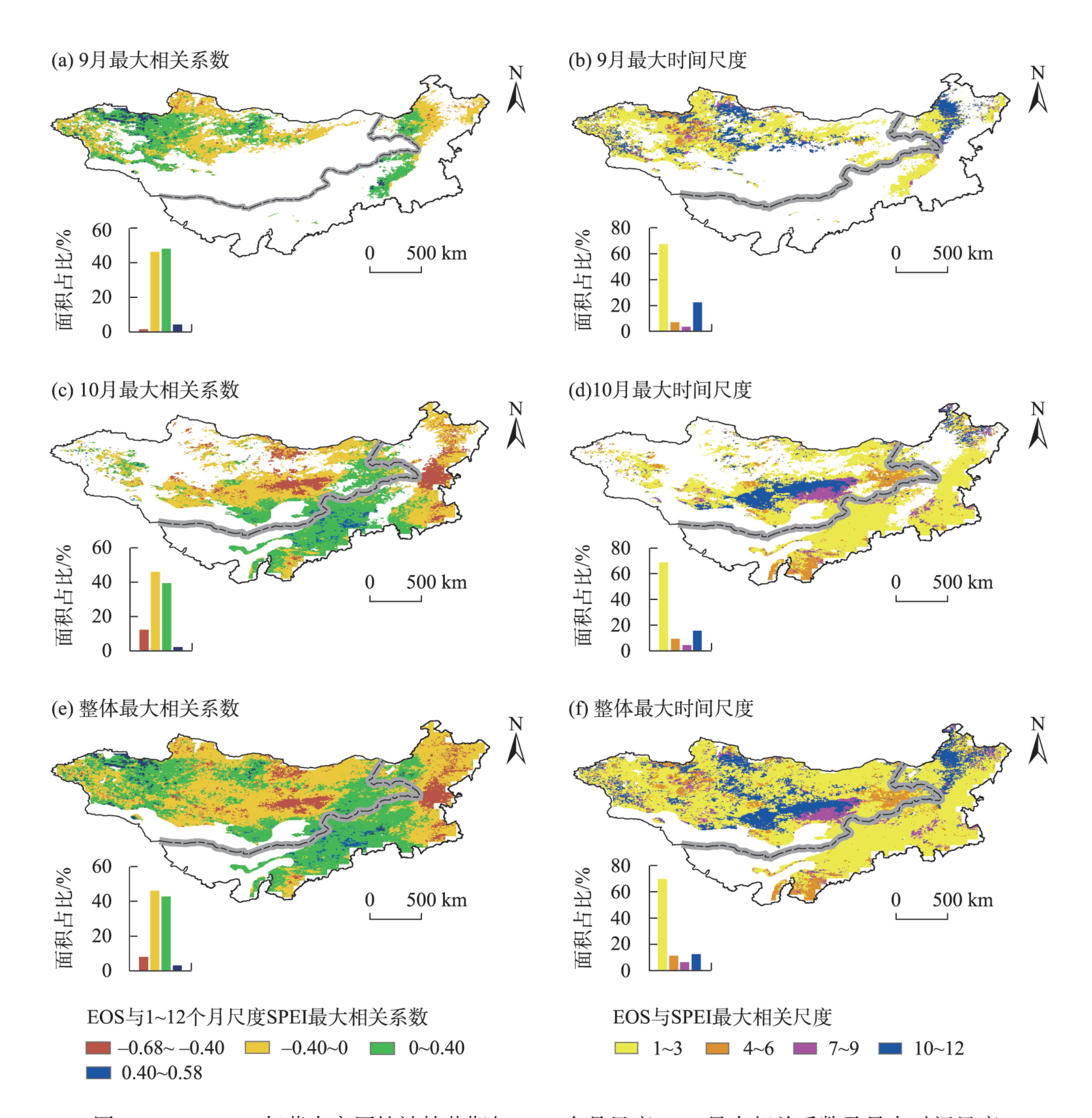


图6　1982—2022年蒙古高原植被枯黄期与1~12个月尺度SPEI最大相关系数及最大时间尺度

Fig. 6 The maximum correlation coefficients and corresponding maximum timescales between EOS and 1-12 months timescales of SPEI in the Mongolian Plateau during 1982-2022

蒙古高原受地理位置影响,年降水量由北部和东部向南部和西部逐渐减小,而气温则由北部和东北部向南部和西南部逐渐增加[10,36-37]。针叶林和森林草原主要分布在蒙古国北部和内蒙古东北部降水较多的区域,且森林植被根系较深,对地下水分利用率较高[38],因此水分不是制约植被返青和枯黄的主要因素,而气温上升促使针叶林和森林草原区主要表现为返青期提前、枯黄期推迟,生长季延长。蒙古高原植被返青期的空间分布格局[30,39]及气温上升导致北部返青期提前[6,16,40]、生长季延长的结论与已有研究[39,41]一致。

荒漠草原和典型草原西南部主要分布在蒙古高原的西部和南部,蒙古高原西南部降水量小且草原植被根系较浅,对地下水分利用率低于森林植被[38],受水分制约明显且蒙古高原西南部干旱化趋势加剧,导致该区域植被返青期推迟。由于蒙古高原的降水量主要集中在夏季[36],干旱对植被枯黄期的累积影响主要为1~3个月的短期尺度(图6),夏季(7—8月)降水量大且植被枯黄期需水量下降,因此枯黄期受水分制约较小,而气温普遍上升有利于延长植被的生长期,因此蒙古高原植被枯黄期主要表现为推迟趋势(图4)。

不同植被类型因其地理位置差异,及对气候、地形和人类活动等因素的响应差异,导致植被物候存在一定的空间差异[7,19,39]。蒙古高原覆盖范围广、地势起伏大、气候和植被类型多样,导致植被物候空间异质性较大,比如典型草原东西和南北跨度大,导致其返青期和枯黄期的空间差异均较大(图4),因此植被物候对局部气候因子、地形、人类活动等差异的响应,需做进一步定量分析。

蒙古高原暖干化背景下,植被返青期主要表现为提前趋势(79.62%),干旱尺度主要是7~9个月的中期尺度,根据SPEI水分平衡的计算原理,说明前一年7月以后的降水量和潜在蒸散量均会对第二年的植被返青产生影响;枯黄期主要表现为推迟趋势(54.15%),干旱尺度主要为1~3个月的短期尺度,说明当年7月及以后的降水量和潜在蒸散量对植被枯黄期的早晚有重要影响。虽然蒙古高原不同尺度SPEI均表现为下降趋势(图2,图3),但突变后的SPEI01、SPEI03的平均值仍为正常等级。总体的干旱化趋势并没有导致这些区域的植被无法返青和提前枯黄,而气温的上升反而促使蒙古高原主要表现为返青期提前和枯黄期推迟趋势,说明目前不同等级的干旱化水平下,仍能保持大部分区域植被返青期和枯黄期的水分需求。蒙古高原仍有20.38%和45.85%的区域分别表现为返青期推迟和枯黄期提前,除了地理位置、局部地形、人类活动等的影响,导致植被返青期推迟或枯黄期提前的干旱临界值亦需要进一步深入研究。

4 结 论

本文采用SPEIbase 2.9和NOAA CDR NDVI数据集,基于累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法反演的植被物候数据集,分析1982—2022年蒙古高原的干旱时空特征、物候变化特征及干旱对返青期和枯黄期的累积影响,得到如下结论:

(1) 1982—2022年1、3、6、12个月尺度SPEI均表现为显著下降趋势,变化率分别为-0.0011、-0.0018、-0.0027和-0.0036,随着时间尺度的增加干旱化趋势加剧;Pettitt检验表明4个尺度SPEI分别在1995年10月、1997年1月、1997年1月和1999年6月发生显著突变。随着干旱累积尺度的增加,干旱化程度加剧。蒙古高原不同尺度的SPEI均呈现由北向南、由东向西下降幅度增大的趋势,随着SPEI累积尺度的增加,呈干旱化趋势的面积明显增大,中部和西部地区干旱化趋势尤为严重。

(2) 返青期提前和推迟的面积百分比分别为50.03%和49.98%,针叶林和森林草原北部返青期显著提前,荒漠草原主要表现为返青期推迟趋势;枯黄期推迟和提前的面积占比分别为67.85%和32.15%,针叶林、森林草原北部和荒漠草原的大部分枯黄期呈推迟趋势,典型草原中部和蒙古国西北部少部分地区枯黄期呈提前趋势。

(3) 蒙古高原(荒漠除外)79.62%的区域植被返青期与1~12个月尺度的SPEI呈最大正相关,干旱对植被返青期的累积影响主要表现为提前效应,干旱尺度主要为4~9个月的中期尺度,尤其是7~9个月尺度的干旱对植被返青影响明显;54.15%的区域植被枯黄期与1~12个月尺度SPEI呈最大负相关,干旱对植被枯黄期的累积影响主要表现为推迟效应,干旱尺度主要为1~3个月的短期尺度。

参考文献(References):

[1] Lee H, Romero J. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contri-

bution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

[2] Stott P. How climate change affects extreme weather events[J]. Science, 2016, 352(6293): 1517−1518.

[3] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

[4] 朴世龙. 近20年来中国植被对气候变化的响应[D]. 北京: 北京大学, 2004. [Piao Shilong. Vegetation Response to Climate Change in China in the Past 20 Years[D]. Beijing: Peking University, 2004.]

[5] 竺可桢. 中国近5000年来气候变迁的初步研究[J]. 考古学报, 1972(1): 168−189. [Zhu Kezhen. A preliminary study on climate change in China over the last 5000 years[J]. Acta Archaeological Sinica, 1972(1): 168−189.]

[6] Liu L, Zhang X. Effects of temperature variability and extremes on spring phenology across the contiguous United States from 1982 to 2016[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17952.

[7] Bao G, Chen J, Chopping M, et al. Dynamics of net primary productivity on the Mongolian Plateau: Joint regulations of phenology and drought[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 81: 85−97.

[8] Cai Q, Chen W, Chen S, et al. Recent pronounced warming on the Mongolian Plateau boosted by internal climate variability[J]. Nature Geoscience, 2024, 17: 1−8.

[9] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts[J]. Science, 2000, 289(5487): 2068−2074.

[10] 秦福莹. 蒙古高原植被时空格局对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [Qin Fuying. Vegetation Patterns and Dynamics in Response to Climate Change Across the Mongolian Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.]

[11] 《中国气象灾害大典》编委会. 中国气象灾害大典内蒙古卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008. [Editorial Board of China Meteorological Disaster Dictionary. Inner Mongolia Volume of China Meteorological Disaster Dictionary[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2008.]

[12] Rao M P, Davi N K, D'Arrigo R D, et al. Dzuds, droughts, and livestock mortality in Mongolia[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(7): 074012.

[13] Begzsuren S, Ellis J E, Ojima D S, et al. Livestock responses to droughts and severe winter weather in the Gobi Three Beauty National Park, Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59(4): 785−796.

[14] 丹丹. 蒙古高原近35 a气候变化[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014. [Dan Dan. Climate Changes in Mongolian Plateau during Last 35 Years[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.]

[15] Lu C, Tian H, Zhang J, et al. Severe long-lasting drought accelerated carbon depletion in the Mongolian Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(10): 5303−5312.

[16] Piao S, Tan J, Chen A, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6911.

[17] Javed T, Li Y, Feng K, et al. Monitoring responses of vegetation phenology and productivity to extreme climatic conditions using remote sensing across different sub-regions of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(3): 3644−3659.

[18] Ma X, Huete A, Moran S, et al. Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(10): 2036−2052.

[19] Luo M, Meng F, Sa C, et al. Response of vegetation phenology to soil moisture dynamics in the Mongolian Plateau[J]. Catena, 2021, 206: 105505.

[20] 张雨惠, 萨楚拉, 孟凡浩, 等. 蒙古高原植被返青期对气候、积雪、土壤水变化的响应特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(6): 1338−1349. [Zhang Yuhui, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Response characteristics of vegetation reforestation period to climate, snow cover and soil water in Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(6): 1338−1349.]

[21] Tong S, Lai Q, Zhang J, et al. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980−2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1557−1565.

[22] Chen Huopo, Sun Jianqi. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2015, 28: 5430−5447.

[23] Goble P E, Bolinger R A, Schumacher R S. A CONUS-wide Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index for major US row crops[J]. Journal of Hydrometeorology, 2021, 22(12): 3141−3158.

[24] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.

[25] Wang Y, Liu G, Guo E. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901−2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 850−862.

[26] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data[J]. Global Change Biology, 2004, 10(7): 1133−1145.

[27] Hou X, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3316−3330.

[28] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.

[29] Eklundh L, Jonsson P. Timesat 3.0 Software Manual[M]. Sweden: Lund University, 2009.

[30] 姜康, 包刚, 乌兰图雅, 等. 2001-2017年蒙古高原不同植被返青期变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2490-2499. [Jiang Kang, Bao Gang, Wulan Tuya, et al. Variations in spring phenology of different vegetation types in the Mongolian Plateau and its responses to climate change during 2001-2017[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2490-2499.]

[31] Tong S, Zhang J, Bao Y, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982-2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 595-610.

[32] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 1979, 28(2): 126-135.

[33] Jaiswal R K, Lohani A K, Tiwari H L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters[J]. Environmental Processes, 2015, 2: 729-749.

[34] Jia L, Li Z, Xu G, et al. Dynamic change of vegetation and its response to climate and topographic factors in the Xijiang River basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 11637-11648.

[35] 乌日娜, 刘步云, 包玉海. 干旱对中国北方草原总初级生产力影响的时滞和累积效应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1644-1660. [Wu Rina, Liu Buyun, Bao Yuhai. Time lag and cumulative effect of drought on gross primary productivity in the grasslands of northern China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1644-1660.]

[36] Jiang L, Yao Z, Huang H Q. Climate variability and change on the Mongolian Plateau: Historical variation and future predictions[J]. Climate Research, 2016, 67(1): 1-14.

[37] 张惠婷, 孟凡浩, 萨楚拉, 等. 2001—2019年蒙古高原生态系统质量时空格局变化及归因分析[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 425-435. [Zhang Huiting, Meng Fanhao, Sa Chula, et al. Spatiotemporal variation and their cause analysis ecosystem quality in Mongolian Plateau during 2001 to 2019[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 425-435.]

[38] Wu X, Liu H, Li X, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere[J]. Global Change Biology, 2018, 24(1): 504-516.

[39] 王佳新. 蒙古高原土壤水分时空变化及其对草地植被物候的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021. [Wang Jiaxin. Spatiotemporal Variation of Soil Moisture and Its Effect on Grassland Vegetation Phenology in the Mongolian Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2021.]

[40] Zeng Z, Wu W, Ge Q, et al. Legacy effects of spring phenology on vegetation growth under preseason meteorological drought in the Northern Hemisphere[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 310: 108630.

[41] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997, 386: 698-702.

The spatiotemporal dynamics of drought and the cumulative impact on vegetation phenology in the Mongolian Plateau

ZHANG Qiaofeng[1,2], YU Hongbo[1,2], HUANG Fang[3]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: The Mongolian Plateau is a crucial ecological zone in northern China. The SPEIbase 2.9 dataset and the logistic curvature extremum method based on cumulative NDVI data were used to elucidate the spatiotemporal dynamics of drought and its impact on vegetation phenology in the Mongolian Plateau. The vegetation phenology dataset was inverted to explore the cumulative impact of drought on the start and end of the growing season (SOS and EOS, respectively) in the Mongolian Plateau from 1982 through 2022. Different time scales of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) showed significant decreasing trends. With larger timescales, the drought degree intensified, and the area of drought increased significantly. The droughts were particularly severe in the central and western regions. Earlier and later SOS were observed in 50.03% and 49.97% of regions, respectively, and later and earlier EOS were observed in 67.85% and 32.15% of regions, respectively. Overall, SOS and EOS were delayed in the desert steppe. In contrast, the SOS occurred earlier significantly and the EOS occurred later both in the coniferous forest and in northern part of the forest steppe. Positive correlation values for SPEI and SOS were maximal during a 1−12 months timescales for 79.62% of the region in the Mongolian Plateau (excluding deserts); over an intermediate-term timescale, a drought duration of 7−9 months had a significant impact on the SOS. Negative correlations between SPEI and EOS over a 1−12 months timescales were highest for 54.15% of the study area, primarily over a 1−3 months timescales. Our findings can help elucidate the factors critical for drought prevention and predict its impact on vegetation phenology and productivity in the Mongolian Plateau.

Keywords: drought; vegetation phenology; start of the growing season (SOS); end of the growing season (EOS); Mongolian Plateau